

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2021.1\(484\).2](https://doi.org/10.15589/znп2021.1(484).2)
УДК 629.5.028.3:004.942

USING OF SPECIAL MODELING'S COMPLEX FOR DESIGNING OF MARINE TETHERED SYSTEM WITH FLEXIBLE LINKS

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МОРСЬКИХ ПРИВ'ЯЗНИХ СИСТЕМ З ГНУЧКИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Kostiantyn S. Trunin
trunin.konstantin.stanislaw@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6345-6257

К. С. Трунін,
канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Analysis of design problems in creating of Marine Tethered Systems (MTS) with Flexible Links (FL), on example, Underwater Tethered Systems (UTeS) and Underwater Towed System (UTS), indicates that great theoretical problem and scientific capacity are calculations of FL of MTS. In this connection tasks and creation of function's models of MTS with FL are arise at quasi-stationary and dynamics modes of operation of mathematical models of dynamics description of FL of MTS and MTS with FL, creating of complex for computer modelling of quasi-stationary and dynamics modes of MTS operation. One's of technical problems under in the time is rational choice of accounting loads. Experimental (full-scale) tests to research loads acting on them are prefer in spite of their complicate and labour content. However, these experiments are very expensive and need huge efforts to its organization, prepare and carry out. The solution of this problem may be creation of Special Modelling Complex (SMC) for designing of MTS with FL which based at the Mathematical Models (MM) and Computer Program (CP) of the dynamics FL of MTS and MTS with FL. In this article are examined problems and theoretical basis for create SMC for designing of MTS with FL on example UTeS. The possibility is shows of it's using for almost all classes of MTS with FL and of modelling possible accident's modes. SMC allows to carry out modelling experiment not carry out physical experiment. In the time of modelling of different modes of work of MTS with FL is possible down to extreme and emergency. These modes highly not simple to made at natural conditions, sometimes this may be dangerous for tugboat of MTS, crews and personnel and be able to losses of property at best.

The offered SMC allows:

- to realize the designing process of MTS with FL with necessary properties and parameters;
- to examine different modes of it's operated at real time;
- take into account minimum (prescribed) radius of bend of FL at the cable reel;
- take into account dynamical impact loads at FL;
- take into account the hydrodynamic forces which emerge under lateral vibration of FL in the water current;
- take into account prescribed floatability;
- to work out recommendations of prognosis of possibility loads for designing of MTS with FL and bring up its to engineering appendix.

Key words: Marine Tethered Systems (MTS); Flexible Links (FL); Underwater Towed System (UTS); designing; perfection of designing; mathematical (MM) model of MTS with FL dynamics; Special Modelling Complex (SMC) for designing of MTS with FL.

Анотація. Однією з технічних проблем у проєктуванні МПС з ГЗ є раціональний вибір розрахункових навантажень. Експериментальні (натурні) випробування з дослідження навантажень, які діють на елементи МПС, є переважними, незважаючи на їх складність та трудомісткість. Однак такі експерименти є доволі витратними та потребують великих зусиль з їх організації, підготовки та проведення.

Вирішенням такої проблеми може бути створення спеціального моделюючого комплексу (СМК) для проєктування МПС з ГЗ, який базується на математичній моделі (ММ) динаміки ГЗ МПС та МПС з ГЗ.

У статті розглянуто проблеми та теоретичні основи створення моделюючого комплексу для проєктування МПС з ГЗ з використанням ММ та комп'ютерної програми (КП) динаміки ГЗ МПС та МПС з ГЗ на прикладі ПБС.

Показано можливість їх використання практично для всіх видів МПС з ГЗ, а також моделювання можливих аварійних режимів роботи.

СМК дає можливість проводити модельний експеримент не звертаючись до фізичного експерименту. При цьому можливе моделювання різних режимів роботи МПС з ГЗ, яка проєктується, як екстремальних, так і аварійних. Такі режими буває дуже складно створити в природних умовах, іноді це може бути небезпечним для судна-буксирувальника (СБ) МПС, екіпажу та персоналу і в найкращому випадку призведе до матеріальних втрат. Запропонований СМК дає можливість:

- здійснювати процес проєктування МПС з ГЗ з необхідними властивостями та параметрами;
- досліджувати різноманітні режими їх експлуатації в реальному масштабі часу;
- враховувати мінімальний (заданий) радіус вигину ГЗ на барабані лебідки;
- враховувати динамічні ударні навантаження в ГЗ;
- враховувати сили гідродинамічної природи, які виникають у разі поперечної вібрації ГЗ у потоці води;
- враховувати задану плавучість ГЗ;
- розробити рекомендації з прогнозування можливих навантажень для проєктування судових палубних лебідок (СПМ) та довести їх до рівня інженерного додатку.

Ключові слова: морська прив'язна система (МПС); гнучкий зв'язок (ГЗ); підводна буксирувана система (ПБС); математична модель (ММ) динаміки МПС з ГЗ; спеціальний моделюючий комплекс (СМК) для проєктування МПС з ГЗ.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Виникнення нових завдань в освоєнні Світового океану, морів і внутрішніх водойм вимагає натеper удосконалення конструкцій морських прив'язних систем (МПС) з гнучкими зв'язками (ГЗ). При цьому виникають завдання розробки моделей функціонування МПС з ГЗ у квазістаціонарних режимах роботи, математичних моделей (ММ) опису динаміки ГЗ МПС і МПС з ГЗ, створення комплексу для комп'ютерного моделювання квазістаціонарних та динамічних режимів роботи МПС.

Нині в основі проєктування МПС з ГЗ необхідна наявність нових ММ опису динаміки ГЗ МПС і МПС з ГЗ, які дозволять відповісти на питання проєктування з максимальним урахуванням їх експлуатаційних властивостей в комплексі і виходом на конструктивні характеристики (вдосконалення проєктних розрахунків конструктивних елементів МПС з ГЗ).

З точки зору механіки МПС являє собою систему, яка об'єднує два різні об'єкти: прив'язний об'єкт (судна-носія СН та ПА), який може розглядатися як абсолютно тверде тіло, і ГЗ – систему з розподіленими параметрами. При цьому ММ включає: математичну модель ГЗ; математичні моделі тіл, які з'єднуються ГЗ на її кінцях; рівняння, які описують динаміку тіл як граничні умови для ГЗ.

Аналіз різних класів МПС з ГЗ показав, що наявні натеper конструкції мають завищені масо-габаритні показники і матеріалоемність, що впливає на водотоннажність і тактико-технічні характеристики (ТТХ) СН ПБС і веде до збільшення експлуатаційних витрат, зниження конкуренції на ринку таких конструкцій і, зрештою, до зниження прибутків від реалізації таких конструкцій, а значить і розроблених проєктів МПС з ГЗ. Від властивостей металоконструкції залежить довговічність і надійність роботи

суднових палубних механізмів (СПМ) МПС, тому під час проєктування особливу увагу необхідно звертати на вдосконалення конструктивних форм і методів їх розрахунку, на економію металу за одночасного забезпечення надійності, довговічності, зручності обслуговування і ремонту. Рішення такої проблеми дозволить також більш рентабельно використовувати енергетичну установку СН МПС, а також обсяги судових приміщень, в яких розміщуються компоненти МПС. Важливим натеper є економія матеріальних ресурсів, тому що завищені габарити СПМ або ГЗ ведуть до підвищеної витрати палива, наприклад, для головної енергетичної установки (ГЕУ) СН, збільшення потужності ГЕУ СН і т.п., тобто йдеться не про мінімізацію використовуваних коефіцієнтів запасу міцності, а повну відмову від їх використання в конструкторських розрахунках МПС.

Динамічна модель може бути представлена у вигляді інтегральних рівнянь, передавальних функцій, а в аналітичній формі – залежності фазових координат або вихідних параметрів технічного об'єкта від часу.

Математичний опис полягає у встановленні зв'язків між параметрами процесу і виявленні його граничних і початкових умов, а також у формалізації процесу у вигляді системи математичних співвідношень, що характеризують досліджуваний об'єкт (наприклад, технологічний процес функціонування ПБС). Математичний опис складається на основі матеріальних та енергетичних балансів, а також фізичних законів, що визначають перехідні або будь-які інші специфічні особливості процесу.

На наш погляд, таку проблему дозволив би вирішити спеціальний моделюючий комплекс (СМК), що дає можливість здійснювати процес проєктування МПС з ГЗ на базі ММ і комп'ютерної програми (КП) моделювання динаміки ГЗ МПС та МПС з ГЗ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз проектних завдань під час створення МПС, наприклад, ППС і ПБС (підводних прив'язних систем – ППС, підводних буксируваних систем – ПБС та ін.) показує, що значну теоретичну складність і наукоємність набувають розрахунки ГЗ МПС [1; 2]. Багато дослідників відзначають, що аналітичні методи нині не можна вважати досить алгоритмічними, рішення нових завдань динаміки ГЗ потребує докладання істотних зусиль і витрат часу під час здійснення математичних обчислень. Найбільш перспективним при цьому вважається застосування чисельних методів.

Є велика кількість літератури, присвяченої вивченню поведінки ГЗ у різних середовищах, галузях діяльності. Цьому присвятили свої праці М.М. Александров, Л.С. Астахов, Г.О. Берто, В.С. Блінцов, Б.А. Бугаєнко, Н.І. Виноградов, В.І. Єгоров, І.Б. Іконніков, В.Е. Магула, Т.І. Фоссен, Г.К. Хаген, Д. Фенг та ін.

В [3] В.І. Єгоровим розглянуто порядок виконання робіт під час проектування ПБС. Відзначається, що просторова структура будь-якої гідродинамічної схеми ПБС визначається розташуванням гнучких механічних або електромеханічних зв'язків (буксирно-кабельної частини – БКЧ), що забезпечують механічний, енергетичний та інформаційно-керуючий зв'язок елементів підводної системи – взаємну і з буксирувальником. Конструктивні параметри буксирів зумовлені гідродинамічною схемою ПБС, прийнятою відповідно до технічного завдання на її проектування. Насамперед вони залежать від поглиблення Y , швидкості буксирування v_0 і кривої тягових зусиль буксирувальника $T = T(v)$. У разі визначення цих параметрів вагоме значення мають також характеристики тяглових лебідок і спуско-підйомних пристроїв СН (буксирувальника). Модель опису ГЗ ПБС не дає можливості визначити режими маневрування МПС, що призводять до вібрації поганообтічних ГЗ у потоці.

У розвитку ППС останніх десятиліть, як відзначає Н.І. Виноградов та ін. [1, с. 12], проявляються тенденції до розширення діапазонів припустимих режимів їх використання: швидкостей руху, заглиблених підводних апаратів (ПА) та умов впливу зовнішнього середовища (ступеня хвилювання моря, швидкості течії, ухилів дна, прозорості морської води і т.п.). Вони також відзначають, що незважаючи на функціональне і конструктивне різноманіття сучасних ППС, їх розробники стикаються з низкою подібних проблем і потребують розробки загальних підходів до їх вирішення. Найбільш суттєвою особливістю динаміки ППС, що ускладнює її порівняно з відомою теорією руху в рідині і газі автономних твердих тіл, вони вважають необхідність врахування впливу ГЗ як системи з розподіленими параметрами.

У статті Дакуї Фенг та ін. «Новий метод проектування підводної буксированої системи» [4] розглянута гідродинамічна модель буксированої системи.

Модель буксированого кабелю в цій роботі заснована на методі Аблоу і Шехтера. У цій статті пропонується спосіб створення буксированої системи. Основне рівняння вирішується з використанням чисельного методу Рунге-Кутта 4-го порядку для стабільного кабелю. Результати обчислень близькі до вимірюваних.

У дисертації Ховер Франца Стефена «Розрахунок динамічних рухів і напруженості в підводних буксированих кабелях» [5] розглянуто матричний метод для аналізу системи позиціонування для визначення динамічної реакції ПБС. Використано еквівалентну лінеаризацію і теорію малих збурень, модель хитавиці буксированого тіла. Два основні спрощення є загальними: малі збурення та еквівалентна лінеаризація. У першому випадку динамічні прогини вважаються малими рухами від статичної конфігурації, форма яких відома. Така модель не дає можливості описувати динаміку ГЗ за великих переміщень ГЗ у складі МПС.

У дисертації Сюзанни Д. Ранмутугали «Комп'ютерне моделювання та дослідження підводних дволанкових і багатоланкових буксированих систем» [6] зроблена спроба вирішення проблеми опису руху ПБС. Описано тривимірну динамічну комп'ютерну модель, розроблену для вивчення дволанкової ПБС шляхом моделювання кабелів окремо та їх динаміки. Цей підхід також дозволяє моделювати послідовні і паралельні конфігурації ПБС з декількома буксированими тілами. Кабельна система змодельована з використанням відмінного підходу трьох ступенів свободи, потім використані шість ступенів свободи підводних буксированих тіл у відповідних місцях кабельної системи. Моделювання кабелю як суцільного середовища і виведення швидкості хвилі напруги представляє його як дискретну модель. Ця модель не дає можливості визначати резонансні режими розтягання ГЗ та максимальні навантаження на ГЗ для оцінки його міцності в процесі маневрування СН та ПА.

У роботі Ши-кун Панга та ін. «Аналіз стану руху буксированої частини підводної буксированої системи транспортного засобу при розгортанні троса» [7] досліджено вплив буксированого троса перемінної довжини на рух допоміжного буксированого транспортного засобу. Застосовується вдосконалений метод Лагранжа. Описано рух частин буксирного кабелю фіксованої довжини і на етапах розгортання. Використаний метод зосереджених мас з побудовою кінетичної моделі дволанкової ПБС. Конфігурація буксирного троса і характеристика руху допоміжного буксированого транспортного засобу розраховувалися для різних швидкостей буксирования і розгортання. Однак виникає велика похибка апроксимації ГЗ, ніж з використанням функцій Ерміта. У моделі розглянуто змінну кількість елементів ГЗ. Модель ГЗ тривимірна, але результати отримані для двовірної моделі. Пружність ГЗ врахована.

У статті Вей-кай Цюань, Чжу-ін Чжан та ін. «Геометрично точне формулювання для тривимірного чисель-

ного моделювання пуповини в глибоководній системі РОВ» [8] розглянуто кабель змінної довжини. Під час аналізу руху буксируваних тіл використовуються метод Лагранжа і метод зосереджених мас. Під час аналізу ГЗ використовується змінна кількість елементів.

У статті Бредлі Дж. Бакхема та ін. «Динаміка й управління буксированою підводною системою», ч. 1: розвиток моделі» [9] розглянуто динаміку буксированого транспортного засобу і буксированого об'єкта. Для систем, в яких маса буксированого засобу порівняна з масою буксировального засобу необхідно враховувати їх загальну динаміку. Розроблено модель, яка призначена для пошуку мін, використано наближення зосередженої маси для буксированого транспортного засобу в зв'язку з нелінійними чисельними моделями керованого буксирного судна.

У статті Ф.С. Ховер, М.Ф. Грозенбо і М. Тріантафіллу «Розрахунок динаміки руху і напруг у буксирних підводних тросах» [10] матричний метод аналізу системи розширено для обліку динамічної реакції буксированої системи. Ключовим є використання методу еквівалентної лінеаризації і малих збурень, кутів нахилу буксирного тіла. Розглянуто два приклади: перший використовує фундаментальні обмеження для пасивної компенсації тяги, а другий стосується використання плаваючих зв'язків для динамічного розвантаження. ГЗ моделюється в диференціальному наближенні (у разі малих збурень форми ГЗ). Така динамічна модель є двовимірною без урахування згинальної жорсткості ГЗ, без проміжних елементів ГЗ.

Наявні методи розрахунку і проектування або є спрощеними і не враховують дійсні навантаження і характер навантаження ГЗ МПС або є досить складними і громіздкими для конструкторів-проектантів, в зв'язку з чим вимагають значних витрат часу для їх виконання.

Аналіз наявних моделей динаміки ГЗ МПС показав, що в більшості моделей елемента ГЗ у МПС розглядають динаміку ГЗ за відносно малих переміщень і вигинів, що свідчить про актуальність розробки ММ динаміки руху елемента ГЗ, що дозволяє враховувати великі переміщення ГЗ у складі МПС.

Необхідно відзначити, що дотепер комплекс, який дозволяв би описувати динаміку ГЗ МПС і МПС з ГЗ, поки не створено, про що свідчить огляд наявної літератури. Є тільки окремі спроби опису динаміки деяких елементів МПС з ГЗ: гнучких трубопроводів [11], опис процесу динамічного моделювання буксированої кабельної системи з використанням центрального позиціонування кінцевих елементів і простого інтегрування [12], рух і ступінь деформації гнучкого шлангу ППС [13], аналіз параболічної частини профілю підводного буксирного кабелю [14] та ін.

МЕТА СТАТТІ

Метою цього дослідження є обґрунтування можливості створення спеціального моделюючого комп-

лексу (СМК) для проектування МПС з ГЗ шляхом використання розроблених ММ і комп'ютерної програми (КП) опису динаміки ГЗ МПС та МПС з ГЗ з урахуванням їх експлуатаційних характеристик.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

1.1. Наявні методи розрахунків і проектування МПС з ГЗ

Згідно з єдиною системою конструкторської документації (ЄСКД), проектування нового виробу складається з таких стадій, як [15]:

- складання технічного завдання;
- розрахунок технічної пропозиції;
- розробка ескізного проекту;
- підготовка робочої конструкторської документації (РКД), проведення нормоконтролю, патентної і метрологічної експертизи;
- виготовлення та випробування дослідного зразка;
- коригування робочого проекту та випуск нової партії виробу;
- перевірка, узгодження, внесення змін, затвердження і передача документації до відділу головного технолога.

Більш змістовно порядок виконання робіт під час проектування МПС на прикладі ППС та етапи такого розрахунку докладно наведені в [15, с. 38–40].

Як зазначається в [1; 3; 16], натеper немає єдиної теорії проектування МПС з ГЗ (надводних, підводних (буксированих і прив'язаних), стаціонарних і дрейфуючих, яка би враховувала всі істотні фактори експлуатації ГЗ і достовірно дозволяла їх проектувати.

На рис. 1 наведено схему проектування МПС з ГЗ.

Процес проектування починається зі з'ясування призначення МПС (відповідь на питання: для чого створюється система, де, коли і в який час вона буде використовуватися). Формулюються вимоги до МПС (надійність, корисна вантажопідйомність, тривалість автономної дії та ін.).

Потім формулюються обмеження, що накладаються особливостями морського середовища (стан моря, сила вітру, гідростатичний тиск, вплив морських організмів, корозійне руйнування і т.п.). Здійснюється вибір типу МПС (поверхнева, заглиблена, однакірна, багатокірна і т.п.). Уточнюється конструктивний тип системи і виконується оцінка механічних навантажень. Тут же формулюються обмеження бюджетного (оцінка фінансових витрат) і матеріально-технічного характеру (розробляються заходи щодо матеріально-технічного забезпечення використання МПС). Всі ці етапи пов'язані з передескізним та ескізним проектуванням системи. Після цього переходять до робочого проектування системи і виготовлення дослідного зразка. Це система проектування, яка склалася.

Пропонується метод вдосконалення проектування МПС з ГЗ з використанням СМК [15, с. 40–44].

1.2. Розвиток наявних методів проектування МПС

Найважливішим елементом проектування будь-якої технічної системи натеper є необхідність розробки концепції. Детально концепція вдосконалення проектування (КСП) описана в [15, с. 38]. КСП МПС з ГЗ як невід’ємна частина процесу проектування МПС з ГС полягає у створенні комплексної моделі вдосконалення проектування МПС з ГЗ. Це дозволяє враховувати внутрішні та зовнішні чинники середовища, які впливають на експлуатацію МПС. Можливий також облік нових властивостей ГЗ МПС, які раніше не враховувалися.

У разі здійснення проектування МПС з ГЗ за допомогою СМК з’являється можливість отримати достовірні результати вже на ранніх стадіях дослідного проектування. При цьому зменшуються всі види витрат, враховується специфіка експлуатації МПС (внутрішніх і зовнішніх факторів середовища).

На рис. 2 представлена укрупнена схема вдосконалення проектних завдань: методів проектування МПС з ГЗ. Спочатку залежно від типу МПС дається опис процесу функціонування МПС. Потім створюється ММ функціонування МПС. Формування множини варіантів структур системи буде залежати від цілей і завдань, які виконуватиме проектована МПС.

1.3. Спеціальний моделюючий комплекс (СМК) для проектування МПС з ГЗ

Запропонований СМК ґрунтується на розроблених ММ динаміки ГЗ МПС і МПС з ГЗ [2; 17–19; 20] і КП опису динаміки ГЗ МПС (і МПС з ГЗ) [21; 22]. Він дозволяє: удосконалити наявні методи розрахунку і проектування МПС з ГЗ і довести їх до рівня інженерного додатку, досліджувати різні режими експлуатації практично всіх класів МПС [23–25], отримати значення сил, що діють на ГЗ (і в ній) і робочі органи суднових лебідок [26], оцінити реальні руйнуючі зусилля в ГЗ і МПС. Це дає можливість також розробити рекомендації з прогнозування можливих навантажень для проектування їх елементів, зменшити масо-габаритні характеристики суднових палубних пристроїв.

СМК дозволяє проводити модельний експеримент, не звертаючись до фізичного експерименту. При цьому можливе моделювання різних режимів роботи проектованої МПС з ГС, аж до екстремальних і аварійних [27]. Такі режими вельми непросто створити в природних умовах, а іноді це може бути просто небезпечним для судна-буксирувальника (СБ) МПС, екіпажу та персоналу і приведе в кращому випадку до матеріальних втрат.

СМК є свого роду тренажером для конструктора-проектувальника. Різні варіанти можуть записуватися і зберігатися, створюються і накопичуються бази

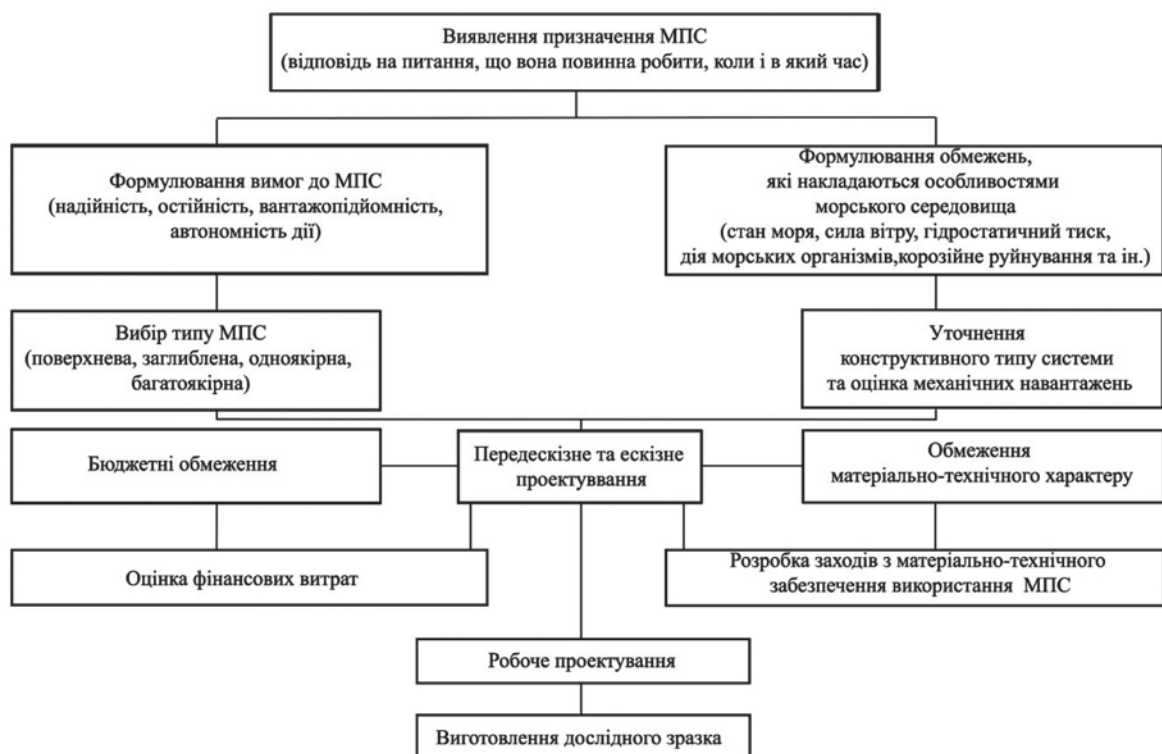


Рис. 1. Схема проектування МПС з ГЗ

даних (БД) різних МПС. При цьому інформація отримується не з фізичного експерименту, а з модельного уявлення про фізичну реальність.

Такий підхід використовується в тих випадках, коли реальні експерименти утруднені через фінансові або фізичні перешкоди або можуть призвести до непередбачувано небезпечного результату.

Такий СМК дозволяє отримати достовірні інженерні рішення вже на ранніх стадіях проектування (у разі розробки аванпроекту, технічного завдання та технічного проекту).

На рис. 3 наведена схема процесу проектування МПС з ГЗ з використанням СМК на прикладі ПБС. Нижче наведені прийняті скорочення.

Тривимірний модель МПС з ГЗ (ММ динаміки ГЗ і МПС з ГЗ) пов'язана з базами даних як МПС, так і її компонентів (СБ, КЛ, СПП, КБ, БПА, ПЕіУ). Особливість використання такої ММ у разі проектування полягає в тому, що МПС з ГЗ проектується фактично як єдине ціле: зміна будь-якого параметра компонента МПС призводить до автоматичної зміни пов'язаних з ним параметрів і об'єктів аж до креслень, специфікацій, візуалізацій, графіка проектування і т.п. [15].

Оригінальність розробленої ММ динаміки ГС МПС і МПС з ГС полягає в тому, що вона дозволяє

в реальному масштабі часу в динаміці за різних параметрів ГЗ і МПС визначати граничні параметри (можливості) досліджуваного (або заданого) ГЗ для визначених СН і ПА.

Отримані ММ динаміки ГЗ МПС і МПС з ГЗ [2; 17–19; 20] дозволили розробити СМК, який дає змогу під час проектування здійснювати:

- врахування конкретних умов експлуатації ГС МПС і уточнення проблеми зовнішніх сил на базі досвіду та модельного експерименту, наукових досліджень;
- аналіз параметрів морського хвилювання і різних аспектів експлуатації;
- дослідження технологічних процесів використання ГЗ у морських умовах;
- оцінка можливих аварійних ситуацій і вживання заходів з виходу з них;
- обґрунтований вибір критеріїв міцності елементів системи і їх оцінку.

КП моделювання динаміки ГС і МПС з ГЗ розроблена у системі Delphi на основі алгоритму розв'язання системи рівнянь ММ динаміки МПС [21]. Робоче вікно програми на екрані комп'ютера містить вікна для завдання величин параметрів ГЗ та МПС (від 37 до 67) і 4 параметрів алгоритму.

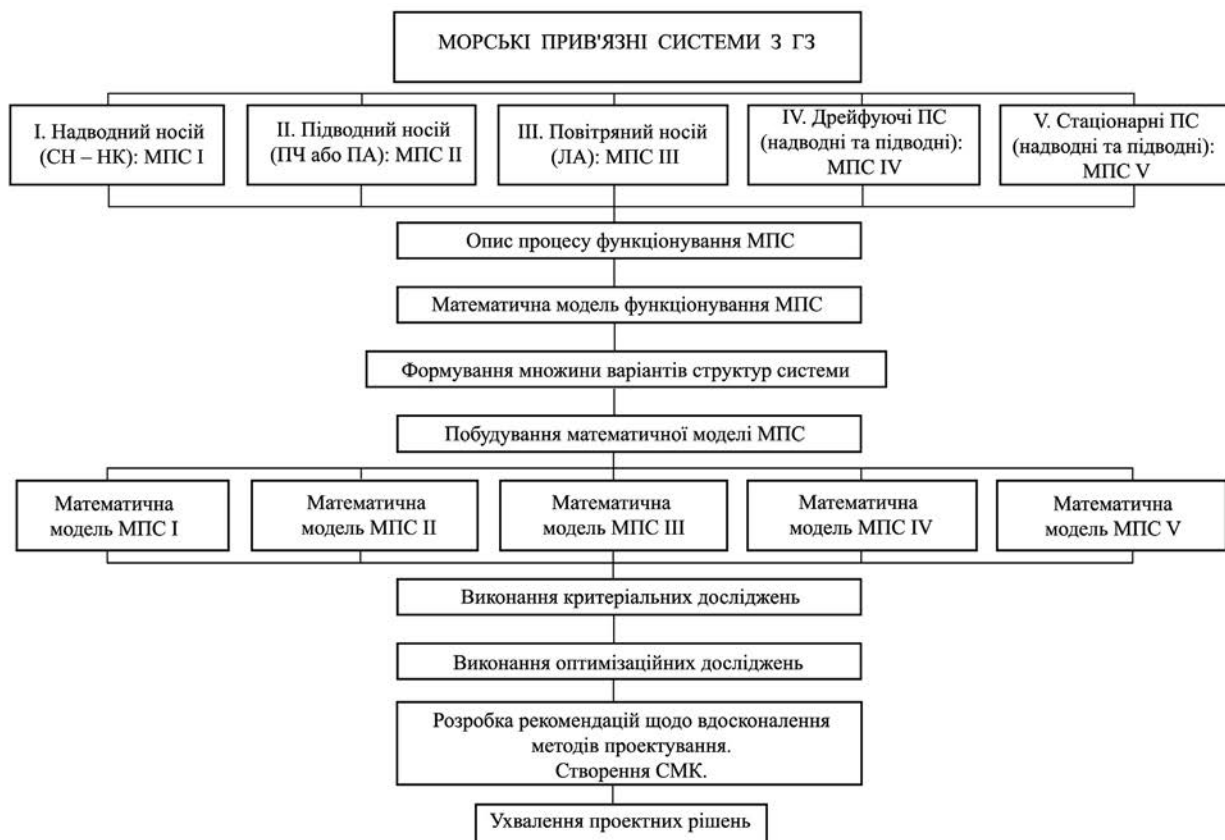


Рис. 2. Схема вдосконалення проектних завдань: методів проектування МПС з ГС

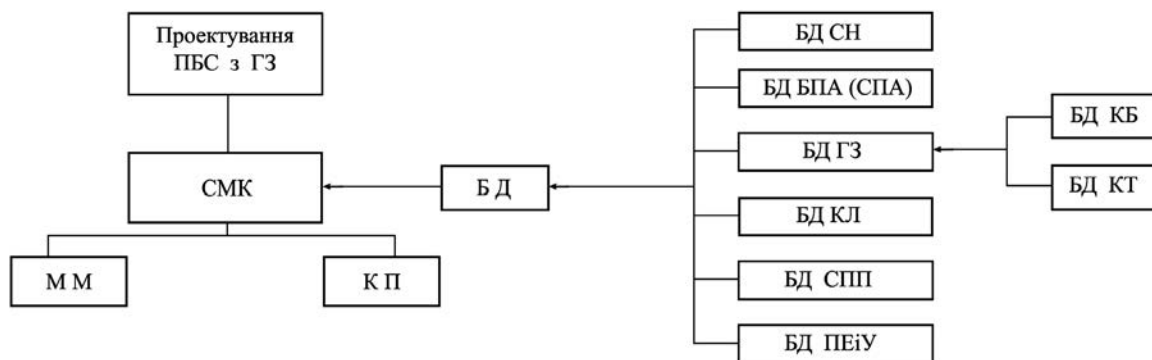


Рис. 3. Процес проєктування ПБС з ГЗ з використанням СМК

Прийняті скорочення на схемі:

ПБС з ГЗ – підводна буксирувана система з гнучким зв'язком;
СМК – спеціальний моделюючий комплекс;
ММ – математична модель опису динаміки ПБС з ГЗ;
КП – комп'ютерна програма моделювання динаміки ПБС з ГЗ;
БД – база даних;
БД СН – база даних судна-носія (буксирувальника);
БД БПА – база даних буксированого підводного апарату;

БД СПА – база даних самохідного підводного апарату;

БД ГЗ – база даних гнучкого зв'язку;

БД КБ – база даних кабель-буксира;

БД КТ – база даних кабель-троса;

БД КЛ – база даних кабельної лебідки;

БД СПП – база даних спуско-підйомного пристрою;

БД ПЕіУ – база даних поста енергетики і управління;

Праворуч від цих вікон коротко записано назву параметрів та їх розмірності. У процесі виконання програми користувач може спостерігати на діаграмах робочих вікон зміну положення вузлів елементів ГЗ, на кінцях якої великими маркерами показані координати СН і ПА, а також зміна сил розтягування ГЗ у вузлах його елементів. Це дозволяє оперативно визначати правильність вибору параметрів МПС у разі заданих режимів руху СН і ПА в умовах морських течій, хвилювання поверхні моря (синя лінія на діаграмах) і взаємодії елементів МПС з морським дном.

Тестування КП підтвердило добру збіжність результатів моделювання і натурних експериментів [22]. Практична перевірка дозволяє також вирішувати, чи знаходяться в необхідних межах точності помилки вимірювання, що входять до передумов, і чи прийнятні в такому конкретному випадку зроблені припущення. Точність результату якраз і залежить головним чином від того, наскільки точно за допомогою зроблених припущень може бути відображена реальність, яка моделюється.

Оригінальність запропонованої КП моделювання руху МПС полягає в тому, що вона має резерви для розширення і дозволяє отримувати результати в реальному масштабі часу, моделювати різні режими роботи МПС з ГЗ, використовувати її для опису динаміки різних МПС. Однак така модель буде дуже складна і її використання під час проєктування потребує великих витрат машинного часу. Тому її застосовують частіше на заключному етапі проєктування.

Зроблено спробу наблизитися до використання інформаційних моделей (ІМ) у процесі вдосконалення проєктування МПС з ГЗ на прикладі ПБС шляхом використання СМК. Його використання передбачає збір і комплексну обробку всіх необхідних даних (конструкторської, технологічної та ін. інформації з усіма її взаємозв'язками і взаємозалежностями). При цьому МПС у процесі проєктування розглядається як єдиний об'єкт з усіма його елементами, які мають до нього відношення.

За допомогою СМК знизиться собівартість робіт під час проєктування за рахунок меншої кількості конструкторів-проєктантів (замість бригади проєктантів у 4–5 осіб знадобиться 1–2) і прискоряться терміни проєктування (терміни можуть зменшитися в 3–4 рази) [15]. Вже на ранніх стадіях проєктування це дасть можливість отримати конкретний практичний результат, тому що дозволяє отримати готові результати проєкту, а також знизить наукову трудомісткість виконуваних робіт.

Запропонований метод вдосконалення проєктування МПС з ГЗ, заснований на ММ динаміки ГЗ МПС і МПС з ГЗ, дозволяє досліджувати різні режими їх експлуатації практично всіх класів МПС, на відміну від наявних методів. Це дозволяє використовувати його як методику для інженерних розрахунків і розробляти рекомендації з прогнозування можливих експлуатаційних навантажень для проєктування елементів МПС з необхідними властивостями і параметрами. Такий метод проєктування МПС дозволяє також відмовитися від використання фізичного

моделювання режимів функціонування МПС з ГЗ, пов'язаного з проведенням натурних випробувань у відкритому морі.

Отримані результати дозволяють удосконалювати проектування МПС з ГЗ з урахуванням призначення об'єкта, результатів попередніх наукових досліджень, наявних досягнень у галузі науки і техніки і досвіду проектування.

ВИСНОВКИ

Наукова новизна такого підходу полягає в удосконаленні проектування МПС з ГЗ на основі використання розробленого СМК із застосуванням нових ММ динаміки МПС з ГЗ як теоретичної основи для розробки високоефективних МПС з ГЗ. Уперше пропонується комплексний підхід у проектуванні МПС з ГЗ, що дозволяє зменшити кількість етапів проектування МПС ще на стадії дослідного (доескізного) проектування. В результаті використання СМК відпадає необхідність у використанні наступних етапів проектування.

Пропонований СМК, заснований на ММ і КП опису динаміки ГЗ МПС (і МПС з ГЗ), дозволяє удосконалити наявні методи розрахунку і проектування МПС з ГЗ і довести їх до рівня інженерного додатку, досліджувати різні режими експлуатації практично всіх класів МПС, отримати значення сил, що діють на ГЗ і робочі органи суднових палубних лебідок, оцінити реальні зусилля в ГЗ і МПС, зменшити масо-габаритні характеристики суднових палубних пристроїв.

Використання комплексного підходу в проектуванні МПС з ГЗ з використанням т.зв. підходу «єдиної кнопки», коли під час її натискання здійснюється проектування всієї МПС загалом (здійснюється проектування не тільки окремих елементів МПС (ГЗ, КЛ, СН та ін.), а всієї МПС як єдиної системи в цілому з урахуванням впливу елементів МПС один на одного. Використання такої комплексної системи вдосконалення проектування МПС з ГЗ дозволить зменшити кількість етапів проектування МПС (технічного проекту і т.п.).

REFERENCES

- [1] Vinogradov, N. I. (2000). Privyaznie podvodnie systemi. Prikladnye zadachi statiki i dinamiki [Tethered underwater systems. Applied tasks of statics and dynamics] / N.I. Vinogradov and others, SPb: Publ. of S.-Pb. University, 2000. 324 c.
- [2] Blintsov, V. Trunin, K. (2020). Construction of a mathematical model to describe the dynamics of marine technical systems with elastic links in order to improve the process of their design. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774 /1/9 (103), UDC 629.5.01.001.63, DOI: 10.15587/1729-4061.2020.197358. pp. 56–66.
- [3] Egorov, V. I. (1981). Podvodnie buksiruemie systemi: ucheb. posobie [Underwater towed systems]. Leningrad: Sudostroenie, 1981. 304 p.
- [4] Dakui Feng, Weiwen Zhao, Wubo Pei, Yacheng Ma. (2011). A new method of designing Underwater Towed System, Applied Mechanics and materials, Vol. 66–68, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 125–1255. DOI:10.4028/www.scientific.net/Amm.66-68.1251.
- [5] Hover Franz Stephen. (1993). Methods of Positioning Deeply-Towed Underwater Cables: Doctoral dissertation. WHOI-93-14, AD-A268 917. Retrieved from: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/uz/a268917.pdf>.
- [6] Ranmuthugala, S. D. (2000). Computer Simulation and Investigation of Underwater Two-Part and Multi Tow Systems Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, university of Tasmania Retrieved from: [https://epvints.utas.edu.au/1317/whole/raumuthugala Susantha Devaprija2001_ thesis.pdf](https://epvints.utas.edu.au/1317/whole/raumuthugala%20Susantha%20Devaprija2001_thesis.pdf).
- [7] Shi-kun Pang, Hong Cheng, Hong Yi, Jing-yang Liu, Jian Wang. Analysis of Motion State of the Tow-part Underwater Towed Vehicle System During Cable Deployment. Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8084915>.
- [8] Quan W., Zhang Z. A geometrically Exact Formulation for Three-Dimensional Numerical Simulation of the Umbilical Cable in A Deep-Sea ROV System. China Ocean Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 223–240. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13344-015-0016-0>.
- [9] Bucham B., Nahon M., Seto M., Zhao X., Lambert C. Dynamics and control of a towed underwater vehicle system, part I: model development. / Ocean Engineering 30 (2003) pp. 453–470. DOI: 10.1016/s0029-801(02)00029-x. Retrieved from: <https://www.elsevier.com/locate/oceaneng>.
- [10] Hover F. S., Grosenbaugh M. A., Triantafyllou M. S. Calculation of Dynamic Motion and Tensions in Towed Underwater cables. / IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 19, No. 3, July 1994, pp. 449–457. Retrieved from: <https://core.ac.uk/download/pdf/4385954.pdf>.
- [11] Edmans B. D., Pham D. C., Zhang Z.-O., Guo T. F., Sridhar N. and Stewart G. (2019). An Effective Multiscale Methodology for Analysis of marine Flexible Risers. Journal of Marine Science and Engineering. No. 7, 340; DOI: 10.3390/jmse7100340. Retrieved from: <https://c:/users/User/Downloads/jmse-0700340-v2.pdf>.
- [12] Gangqiang Li, Iian Iian, Zhu Z. H. (2015). Dynamic Modeling of Towed System Using the Nodal Position Finite Element and Symplectic Integration. Conference Paper, May 2015. DOI: 10.1115/OMAE2015-41253. Conference: ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, At t. John's, Newfoundland, Canada, Volume 7: Ocean Engineering. Retrieved from: https://researchgate.net/publication/224634680_Dynamics_modeling-and_control_of_a_variable_length_remotely_operated_vehicle_tether.
- [13] Kun-Woo Kim, Jae-Wook Lee, Wan-Suk Yoo. (2012) The motion and deformation rate of a flexible hose connected to a mother ship. Journal of Mechanical science and technology 26 (3), 703–710. DOI: 10.1007/s12206-011-1202-5. Retrieved from:

- [14] Vineet K. Srivastava. Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science. Appl.* (2014) 13: 185–192. DOI: 10.1007/s11804-014-1240-3.
- [15] Blintsov, V., Trunin, K. (2021). Improving the designing of marine tethered systems using the principles of Shipbuilding 4.0. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* ISSN 1729-3774 No. 1/13 (109), UDC 629.5.01.001.63, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225512. pp. 35-48.
- [16] Ikonnikov, I.B., Gavrilov, V. M., Puzyrev, G. V. (1992). *Podvodnie buksiruemie sistemi bui neytralnoy plavuchesty* [Underwater towed systems and buoys of neutral floating]. SPb: Sudostroenie, 224 p.
- [17] Trunin, K. S. (2017). Equation of dynamics of flexible link element of Marine Tethered System. *Sb. nauk. prats of NUK*, No. 1, 18–25. DOI: 10.15589/jnn20170104.
- [18] Trunin, K. S. (2017). The mathematical model of two connection elements of flexible links of marine tethered system. *Sb. nauk. prats of NUK*, No. 2. Pp. 3–10. Retrieved from: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/2681?show=full> DOI 10.15589/jnn20170201 [in Russian].
- [19] Trunin, K. S. (2017). Dynamics of Marine Tethered System with flexible link. *Sb. nauk. prats of NUK*, No. 3, 3–10. DOI: 10.15589/jnn20170301.
- [20] Trunin, K. S. (2019). *Flexible links in Marine Tethered Systems*. Monography. Nikolaev: Publ. of Torubara E.S.; Publ. "Naval", 536 p.
- [21] Trunin K. S. (2017). *Kompyuternaya model dinamiki morskoy privyaznoy sistemy s gibkoy svyazyu* [Computer model of MLS with FL]. [Computer model of the dynamics of a marine tethered system with flexible connection]. *Sb. nauk. prats. NUK*, No. 4, pp. 3–13. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpuuk_2017_4_3 DOI: 10.15589/jnn20170401 [in Russian].
- [22] Trunin, K. S. (2017). Testirovanie kompyuternoy programmy modeli dinamiki morskoy privyaznoy sistemy s gibkoy svyazyu [Testing of computer program of dynamics model of Marine lash system with flexible links element]. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, 1(7), 95–108. DOI: 10.15589/SMI 20170105.
- [23] Trunin, K. S. (2018). Determination of complementary tension of towing rope at the impact to it contrary outsider underwater object at arbitrary phase of rope. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, No. 2, 93–105. DOI: 10.15589/SMI20180209.
- [24] Trunin, K. S. (2017). The three-dimensional nonstationary motion of Marine Tethered System at maneuvering (on example of circulation). *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, No. 2 (8), 103–114. DOI: 10.15589/SMI20170219.
- [25] Trunin, K. S. (2019). The three-dimensional motion of Marine Tethered Systems at example buoy of neutral floating. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, No. 1(11), 18–31. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2019.1\(11\).3](https://doi.org/10.15589/smi2019.1(11).3).
- [26] Trunin, K. S. (2020). Designing of deck cable winches of Marine Tethered Systems with of Flexible Links by using of mathematical modelsof description its dynamics. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, No. 1(13). pp. 56–66, p. 74. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2020.1\(1\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.1(1).1). DOI: 10.15587/1729-4061.2020.197358.
- [27] Trunin, K. S. (2018) Accident modes of Marine Tethered Systems. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, No. 1, 115–126. DOI: 10.15589/SMI. 2018.01.16.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Виноградов, Н. И. (2000) Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики / Н. И. Виноградов, М. Л. Гутман, И. Г. Лев, М. З. Нисевич. Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 324 с.
- [2] Blintsov, V., Trunin, K. (2020). Construction of a mathematical model to describe the dynamics of marine technical systems with elastic links in order to improve the process of their design. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774 /1/9 (103), UDC 629.5.01.001.63, DOI: 10.15587/1729-4061.2020.197358. Pp. 56–66.
- [3] Егоров, В. И. (1981) Подводные буксируемые системы : учебное пособие. Ленинград : Судостроение, 304 с.
- [4] Dakui Feng, Weiwen Zhao, Wubo Pei, Yacheng Ma. (2011). A new method of designing Underwater Towed System. *Applied Mechanics and materials*, Vol. 66–68, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 1251–1255. DOI: 10.4028/www.scientific.net/Amm.66-68.1251.
- [5] Hover Franz Stephen. (1993) Methods of Positioning Deeply-Towed Underwater Cables : Doctoral dissertation. WHOI-93-14, AD-A268 917. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/uz/a268917.pdf>.
- [6] Ranmuthugala, S. D. (2000) Computer Simulation and Investigation of Underwater Two-Part and Multi Tow Systems Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, university of Tasmania URL: [https://epvints.utas.edu.au/1317/whole.raumuthugala SusanthaDevaprija2001_thesis.pdf](https://epvints.utas.edu.au/1317/whole.raumuthugala%20SusanthaDevaprija2001_thesis.pdf).
- [7] Shi-kun Pang, Hong Cheng, Hong Yi, Jing-yang Liu, Jian Wang. Analysis of Motion State of the Tow-part Underwater Towed Vehicle System During Cable Deployment. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8084915>.
- [8] Quan W., Zhang Z. A geometrically Exact Formulation for Three-Dimensional Numerical Simulation of the Umbilical Cable in A Deep-Sea ROV System. *China Ocean Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 223–240. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13344-015-0016-0>.
- [9] Bucham B., Nahon M., Seto M., Zhao X., Lambert C. (2003) Dynamics and control of a towed underwater vehicle system, part I: model development. *Ocean Engineering* 30, pp. 453–470. DOI: 10.1016/s0029-801(02)00029-x. <https://www.elsevier.com/locate/oceaneng>.
- [10] Hover, F. S., Grosenbaugh, M. A., Triantafyllou, M. S. (1994) Calculation of Dynamic Motion and Tensions in Towed Underwater cables. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 19, No. 3, July 1994, pp. 449–457. <https://core.ac.uk/download/pdf/4385954.pdf>.

- [11] Edmans, B. D., Pham, D. C., Zhang, Z. -O., Guo, T. F., Sridhar, N. and Stewart, G. (2019). An Effective Multiscale Methodology for Analysis of marine Flexible Risers. *Journal of Marine Science and Engineering*. No. 7, 340; DOI: 10.3390/jmse7100340. URL: <https://c:/users/User/Downloads/jmse-0700340-v2.pdf>.
- [12] Gangqiang, Li, Iian, Iian, Zhu, Z. H. (2015). Dynamic Modeling of Towed System Using the Nodal Position Finite Element and Symplectic Integration. Conference Paper, May 2015. DOI: 10.1115/OMAE2015-41253. Conference: ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, At t. John's, Newfoundland, Canada, Volume 7: Ocean Engineering. URL: https://researchgate.net/publication/224634680_Dynamics_modeling-and_control_of_a_variable_length_remotely_operated_vehicle_tetter.
- [13] Kun-Woo, Kim, Jae-Wook, Lee, Wan-Su, Yoo. (2012) The motion and deformation rate of a flexible hose connected to a mother ship. *Journal of Mechanical science and technjlogy*, 26 (3): 703–710. DOI 10.1007/s12206-011-1202-5. URL: <https://www.springerlink.com/content/1738-49x>.
- [14] Vineet K. Srivastava. (2014). Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science*. Appl. 13: 185–192. DOI: 10.1007/s11804-014-1240-3.
- [15] Blintsov, V., Trunin, K. (2021). Improving the designing of marine tethered systems using the principles of Shipbuilding 4.0. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774 No. 1/13 (109), UDC 629.5.01.001.63, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225512. Pp. 35–48.
- [16] Подводные буксируемые системы и буи нейтральной плавучести / И. Б. Иконников, В. М. Гаврилов, Г. В. Пузырев. Санкт-Петербург : Судостроение, 1992. 224 с.
- [17] Трунин, К. С. (2017) Уравнения динамики элемента гибкой связи морской привязной системы. *Збірник наукових праць НУК*, № 1, с. 18–25. DOI: 10.15589/jnn20170104.
- [18] Трунин, К.С. (2017). Математическая модель двух связанных элементов гибкой связи морской привязной системы. *Збірник наукових праць НУК*, № 2, с. 3–12. DOI: 10.15589/jnn20170201.
- [19] Трунин, К. С. (2017) Динамика морской привязной системы с гибкой связью. *Збірник наукових праць НУК*, № 3, с. 3–10. DOI: 10.15589/jnn20170301.
- [20] Трунин, К. С. (2019) Гибкие связи в морских привязных системах : монография. Николаев : издательство Торубары Е.С.; издательство «Наваль», 536 с.
- [21] Трунин, К. С. (2017) Компьютерная модель динамики морской привязной системы с гибкой связью. *Збірник наукових праць НУК*, № 4, с. 3–13. DOI: 10.15589/jnn20170401.
- [22] Трунин, К. С. (2017) Тестирование компьютерной программы модели динамики морской привязной системы с гибкой связью. *Судостроение и морская инфраструктура*, № 1(7), с. 95–108. DOI: 10.15589/SMI20170105.
- [23] Трунин К. С. (2018) Определение дополнительного натяжения буксирного троса при ударе по нему встречного постороннего подводного объекта в произвольном месте. *Судостроение и морская инфраструктура*, № 2, с. 93–105. DOI 10.15589/SMI20180209.
- [24] Трунин, К. С. (2017) Пространственное нестационарное движение морских привязных систем при маневрировании (на примере циркуляции). *Судостроение и морская инфраструктура*, № 2 (8), с. 103–114. DOI: 10.15589/SMI20170219.
- [25] Трунин К. С. (2019) The three-dimensional motion of marine tethered system at example buoy of neutral floating (Просторовий рух морських прив'язних систем на прикладі буйів нейтральної плавучості). *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. *Судостроение и морская инфраструктура*, № 1(11), с. 18–31. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2019.1\(11\).3](https://doi.org/10.15589/smi2019.1(11).3).
- [26] Трунин, К. С. (2020) Проектирование судовых палубных лебёдок морских привязных систем с гибкими связями с применением математических моделей описания их динамики. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2020.1\(1\).1](https://doi.org/10.15589/smi2020.1(1).1); *Судостроение и морская инфраструктура*, № 1(13). DOI: 10.15587/1729-4061.2020.197358. pp. 56–66, p. 74.
- [27] Трунин К. С. (2018) Аварийные режимы морских привязных систем. *Судостроение и морская инфраструктура*, № 1, с. 115–126. DOI: 10.15589/SMI.2018.01.16.

© Трунін К. С.

Дата надходження статті до редакції: 09.03.2021

Дата затвердження статті до друку: 23.03.2021